



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

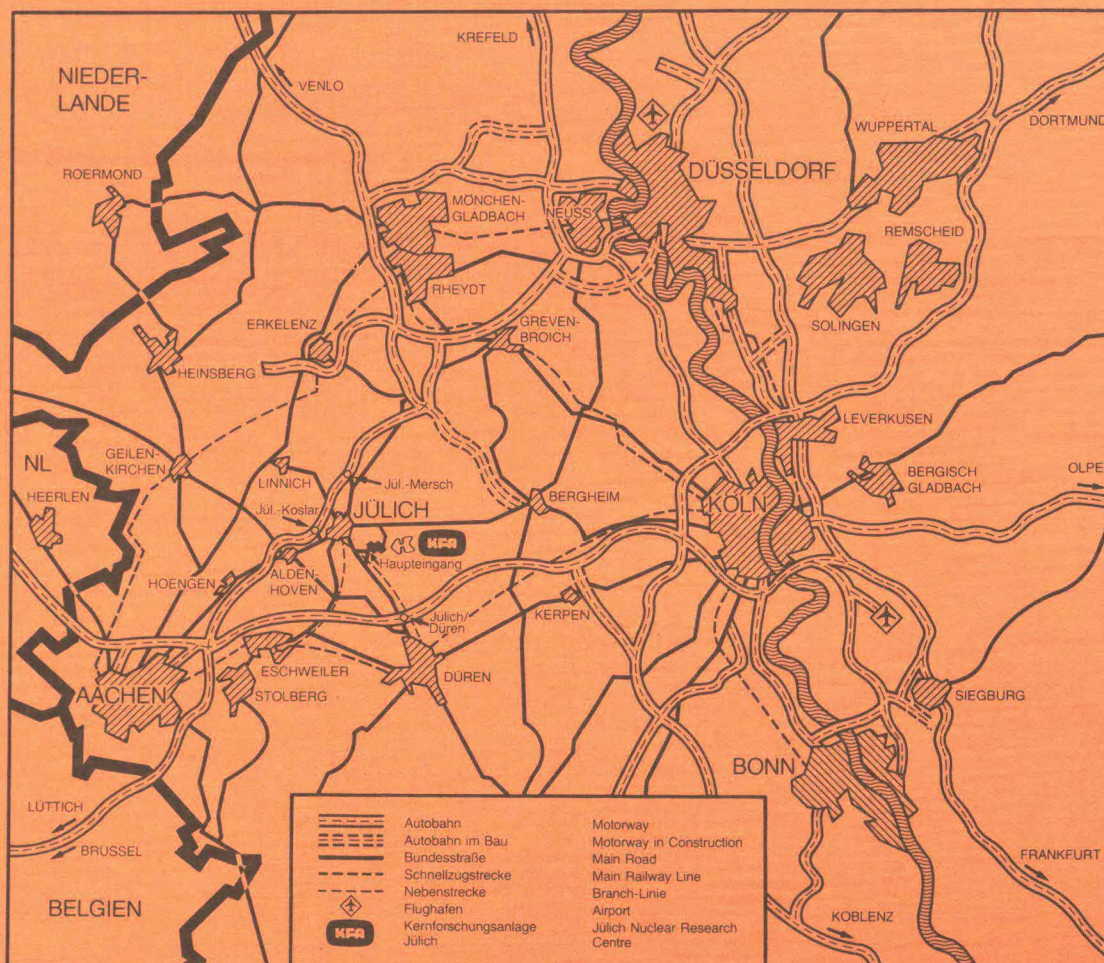
Institut für Kernphysik

**UNTERSUCHUNG ZUR MODIFIKATION
DER STRAHLFÜHRUNG ZWISCHEN
DEM ZYKLOTRON UND DEM
MAGNETSPEKTROGRAPHEN BIG KARL**

von

F. Hinterberger

Jül - Spez - 300
Februar 1985
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 300

Institut für Kernphysik Jül - Spez - 300

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**UNTERSUCHUNG ZUR MODIFIKATION
DER STRAHLFÜHRUNG ZWISCHEN
DEM ZYKLOTRON UND DEM
MAGNETSPEKTROGRAPHEN BIG KARL**

Frank Hinterberger
Institut für Strahlen- und Kernphysik der
Universität Bonn

und

Institut für Kernphysik der
Kernforschungsanlage Jülich

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	2
1. Einleitung	
2. Die Anpassung zwischen Zyklotron und Doppelmonochromator	4
2.1 Problemstellung	4
2.2 Modellannahmen zur Phasenraumverteilung des Zyklotronstrahls	5
2.3 Vorschlag eines Anpassungssystems	8
2.4 Definierte Einstellung der Akzeptanz und Strahlzentrierung	10
3. Der Doppelmonochromator	11
3.1 Gegenwärtiger Zustand	11
3.2 Die geplante Modifikation	14
4. Die Strahlführung zwischen dem Doppelmonochromator und dem Magnetspektrographen	18
5. Dispersionsanpassung und kinematische Anpassung	19
5.1 Formale Betrachtung	19
5.2 Forderungen an die Strahlpräparation	21
5.3 Praktische Realisierung	27
5.4 Die Auflösung	30
6. Schlußfolgerungen und Schlußbemerkungen	34
Literaturverzeichnis	36

Zusammenfassung

Die geplante Modifikation der Strahlführung zwischen dem Jülicher Zyklotron und dem Magnetspektrographen BIG KARL wird im Hinblick auf die Zielsetzung einer optimalen Strahlpräparation diskutiert. Der Bericht enthält eine detaillierte Betrachtung der ionenoptischen Bedingungen für Dispersionsanpassung und kinematische Anpassung. Im Rahmen des Matrixformalismus wird die allgemeine Form der Anpassbedingungen dargestellt.

1. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung hat das Ziel, die geplante Modifikation der Strahlführung zwischen dem Jülicher Zyklotron und dem Magnetspektrographen BIG KARL (RE 83) kritisch zu beleuchten. Die Untersuchung basiert auf einer intensiven Diskussion der Strahlführungsprobleme mit J. Reich, M. Rogge und P. von Rossen, die zur Vorbereitung eines Antrages zur Modernisierung der Strahlführung im Jahre 1984 geführt wurde.

Der Bericht behandelt das System zur Strahlanpassung zwischen Zyklotron und Doppelmonochromator (2. Abschnitt), das Doppelmonochromatorsystem (3. Abschnitt), den nachfolgenden teleskopischen Strahltransport (4. Abschnitt) und die Anpassung der Dispersion und Kinematik für hochauflösende Messungen mit dem Magnetspektrographen (5. Abschnitt). Die ionenoptischen Überlegungen werden im Matrixformalismus in der Notation von K. Brown (BR 80) dargestellt. Numerische Rechnungen wurden mit Hilfe des Transport Programms (BR 80) in linearer Näherung ausgeführt. Die detaillierte Berechnung von Aberrationen 2. und höherer Ordnung wurden im Rahmen dieses Berichtes nicht durchgeführt.

Das besondere Schwergewicht der Untersuchung liegt bei den Problemen der Anpassung. In dem 2. Abschnitt wird neben der Emitanzanpassung die Frage diskutiert, ob die Dispersion des ausgelenkten Zyklotronstrahles im Bereich der Anpassung rückgängig gemacht werden kann, d.h. ob der Strahl achromatisch präpariert werden kann. Der 5. Abschnitt enthält eine umfangreiche formale Betrachtung der simultanen Anpassung von Dispersion und Kinematik, die zur Erreichung einer hohen Energieauflösung in einer sogenannten energy-loss Spektrometeranordnung notwendig ist. Der 6. Abschnitt enthält die Schlußfolgerung aus den Untersuchungsergebnissen.

2. Die Anpassung zwischen Zyklotron und Doppelmonochromator

2.1 Problemstellung

Die primäre Forderung des Anpassungssystems zwischen dem Zyklotronausgang und dem Eingangsschlitz des Doppelmonochromators ist es, den Strahl so zu formen, daß ein Strahlfleck mit $\Delta x_0 = 1 \text{ mm}$ und $\Delta y_0 = 2 \text{ mm}$ entsteht. Gleichzeitig sollten die horizontalen und vertikalen Phasenellipsen aufrecht stehen, d.h. die Strahlenveloppen sollten am Eingangsschlitz des Doppelmonochromators eine Taille mit den o.a. Δx_0 - und Δy_0 - Werten aufweisen.

Zusätzlich wäre es sehr wünschenswert, den ausgelenkten Zyklotronstrahl im Bereich des Anpassungssystems achromatisch zu machen. Damit könnte man die Phasenraumverteilung, bei der die horizontale Phasenellipse wegen der dispersiven Effekte des Zyklotronmagneten und der Auslenkungselemente dispersiv aufgebläht ist, in eine wesentlich günstigere Form transformieren. Diese Maßnahme hätte den Vorteil einer schärferen geometrischen Bündelung des Strahls. Außerdem hätte man an dem Eingangsschlitz des Doppelmonochromators die definierten Übergabebedingungen hinsichtlich der Orts- und Winkeldispersion tatsächlich realisiert, die üblicherweise bei der Anpassung Doppelmonochromator - Spektrometer gemacht werden.

Da die Umbaumaßnahmen bei einer Modifikation des Strahlführungssystems so klein wie möglich gehalten werden sollten, sollte der existierende Ablenkmagnet SM1 (Ablenkwinkel 21.2°) dazu benutzt werden, die Orts- und Winkeldispersion des Strahls rückgängig zu machen. Diese Forderung kann im Prinzip stets mit Hilfe von zwei variablen Quadrupollinsen vor dem Ablenkmagneten verwirklicht werden. Die Schwierigkeit ergibt sich aus der gleichzeitigen Forderung, aufrechte Phasenellipsen mit $\Delta x_0 = 1 \text{ mm}$ und $\Delta y_0 = 2 \text{ mm}$ am Eingangsschlitz des Doppelmonochromators zu formen, der sich

im Abstand von nur 60 cm hinter der Feldkante des Ablenkmagneten SM1 befindet. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich daraus, daß keine experimentelle Information über die Orts- und Winkeldispersion des ausgelenkten Zyklotronstrahls vorliegt.

2.2 Modellannahmen zur Phasenraumverteilung des Zyklotronstrahls

Zur Abschätzung der Effekte und zur Auslegung des Systems muß man daher bestimmte Modellannahmen machen. Zur ersten Abschätzung der Strahldispersion wurde im Bereich des Septums eine reine Ortsdispersion (keine Winkeldispersion) angenommen, die dem "closed orbit" des Zyklotrons entspricht. In den Strahltransportrechnungen kann dies dadurch simuliert werden, daß man das Eigenellipsoid ohne Dispersion durch eine Einheitstransformation mit $R_{16} \neq 0$ ($R_{16} \approx 1$ m am Septum des Jülicher Zyklotrons) umformt (zum Formalismus siehe HI 81). Die so gewonnene Phasenraumverteilung wird dann mit Hilfe von Transportmatrizen (BR 67), die das Transformationsverhalten der Extraktionselemente repräsentieren, zum Ausgang des Zyklotrons transformiert. Diese Transportmatrizen basieren auf Magnetfeldmessungen im Bereich der Extraktionselemente (AL 81). Die resultierende Phasenraumverteilung hat dann am Zyklotronausgang eine bestimmte Orts- und Winkeldispersion.

Das gesamte Extraktionssystem zwischen Septum und Zyklotronausgang (Ende Hauptkanal) hat die folgende Transformationsmatrix (die Einheiten sind mm, mrad und $^{\circ}/\infty$!):

$$R = \begin{vmatrix} -1.47 & 1.12 & 0 & 0 & 0 & 2.82 \\ -0.406 & -0.368 & 0 & 0 & 0 & 0.209 \\ 0 & 0 & 0.925 & 2.90 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.190 & 1.68 & 0 & 0 \\ -0.930 & -1.18 & 0 & 0 & 1.00 & -0.800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.00 \end{vmatrix}$$

Eine genauere Betrachtung der dispersiven Effekte in einem Kompaktzyklotron ergibt jedoch, daß die Strahldispersion von der "closed orbit" Dispersion mehr oder weniger stark abweicht. Diese Abweichungen sind durch die Dispersionsfehlانpassung des Strahls in der Zyklotronmitte und die kohärenten Betatronoszillationen bedingt, die das Dispersionsverhalten benachbarter Bahnen modifizieren (siehe z.B. JO 75). Durch die Dispersionsfehlانpassung im Bereich der Zyklotronmitte variiert die Dispersion des Zyklotronstrahls auf dem Weg zum Extraktionsradius mit der Zahl der Betatronoszillationen (JO 75), d.h. sie ist als Funktion der Bahnzahl für einen festen Azimut periodischen Schwankungen unterworfen. Zusätzlich kommt das Problem der Mehrbahnauslenkung, da die kohärenten Betatronoszillationen die Dispersion zwischen benachbarten Bahnen ebenfalls deutlich modifizieren. Aus diesen Gründen muß man davon ausgehen, daß die effektive Dispersion des vom Septum abgeschalteten Strahles auch von der individuellen Einstellung des Zyklotrons abhängt. Wie groß diese Abhängigkeit ist und welche Dispersion bei optimalen Zyklotroneinstellungen tatsächlich vorliegt, sollte durch eine Messung herausgefunden werden.

Um die Größenordnung der radialen Emittanzvergrößerung durch dispersive Effekte zu charakterisieren, ist in Tab. 1 für verschiedene Annahmen der Ortsdispersion σ_{16}/σ_{66} und Winkeldispersion σ_{26}/σ_{66} am Septum die Emittanzvergrößerung am Septum und am Zyklotronausgang angegeben. Dabei wurde für die monoenergetische Phasenellipse eine Emittanzfläche von 2 mm mrad in der Form des Eigenellipsoids angenommen. Die Impulsunschärfe wurde zu $|\Delta p/p| \leq 2 \text{ } ^\circ/\text{oo}$ angenommen. Die Tabelle zeigt, daß die Emittanzvergrößerung des extrahierten Strahls bei einem Faktor 3 - 5 liegt.

Tabelle 1: Horizontale Emittanzvergrößerung durch dispersive Effekte. Eigenellipse ohne Dispersion:

$$\epsilon_x = \pi \cdot x_0 \cdot \theta_0 = \pi \cdot 0.91 \cdot 0.70 \text{ mm mrad} = 2.0 \text{ mm mrad}$$

fac: Vergrößerungsfaktor ; $|\Delta p/p| \leq 2 \text{ } ^\circ/\text{oo}$

σ_{16}/σ_{66} (mm/ $^\circ/\text{oo}$)	σ_{26}/σ_{66} (mrad/ $^\circ/\text{oo}$)	ϵ_x (Septum) (mm mrad)	fac	ϵ_x (extern) (mm mrad)	fac
0	0	2.0	1.0	7.6	3.8
1.0	0	4.8	2.4	5.3	2.7
1.0	1.0	7.5	3.8	10.8	5.4
1.5	0	6.9	3.5	5.3	2.7
2.0	0	9.0	4.5	6.1	3.1

2.3 Vorschlag eines Anpassungssystems

Da die genaue Größe der Orts- und Winkeldispersion des Strahls am Zyklotronausgang unbekannt ist und vermutlich auch stark von der individuellen Zyklotroneinstellung abhängt, sollte das Anpassungssystem hinreichend flexibel gestaltet werden. Wie bereits erwähnt, besteht die Schwierigkeit, daß zwischen dem Ablenkmagneten SM1 und dem Eingangsschlitze zum Doppelmonochromator praktisch nur sehr wenig Platz für zusätzliche Anpassungselemente vorhanden ist. Es ist jedoch prinzipiell notwendig, mindestens eine Quadrupollinse zwischen SM1 und dem Eingangsschlitze zum Doppelmonochromator vorzusehen, um die horizontale Emittanzanpassung von der Dispersionsanpassung hinreichend entkoppeln zu können. Das gesamte Anpassungssystem sollte 6 Quadrupollinsen enthalten. Mit 6 Quadrupollinsen stehen 6 freie Parameter zur Verfügung. Zwei Parameter werden dazu benötigt, die Orts- und Winkeldispersion rückgängig zu machen, und vier Parameter stehen für die Formung der horizontalen und vertikalen Phasenellipsen zur Verfügung. Die 6 Quadrupollinsen sollten äquidistant angeordnet werden, wobei der erste Quadrupol so nahe wie möglich am Hauptkanal des Zyklotrons stehen sollte, um die zur Verfügung stehende Strecke von 5.5 m zwischen Hauptkanal und Ablenkmagnet SM1 optimal für die Strahlformung zu nutzen.

Wenn man auf die Forderung, den Strahl in jedem Fall achromatisch zu präparieren, verzichtet, ergeben sich als Minimalforderung für eine flexible Anpassung der horizontalen und vertikalen Phasenellipsen 4 freie Parameter, d.h. zusätzlich zu den beiden vorhan-

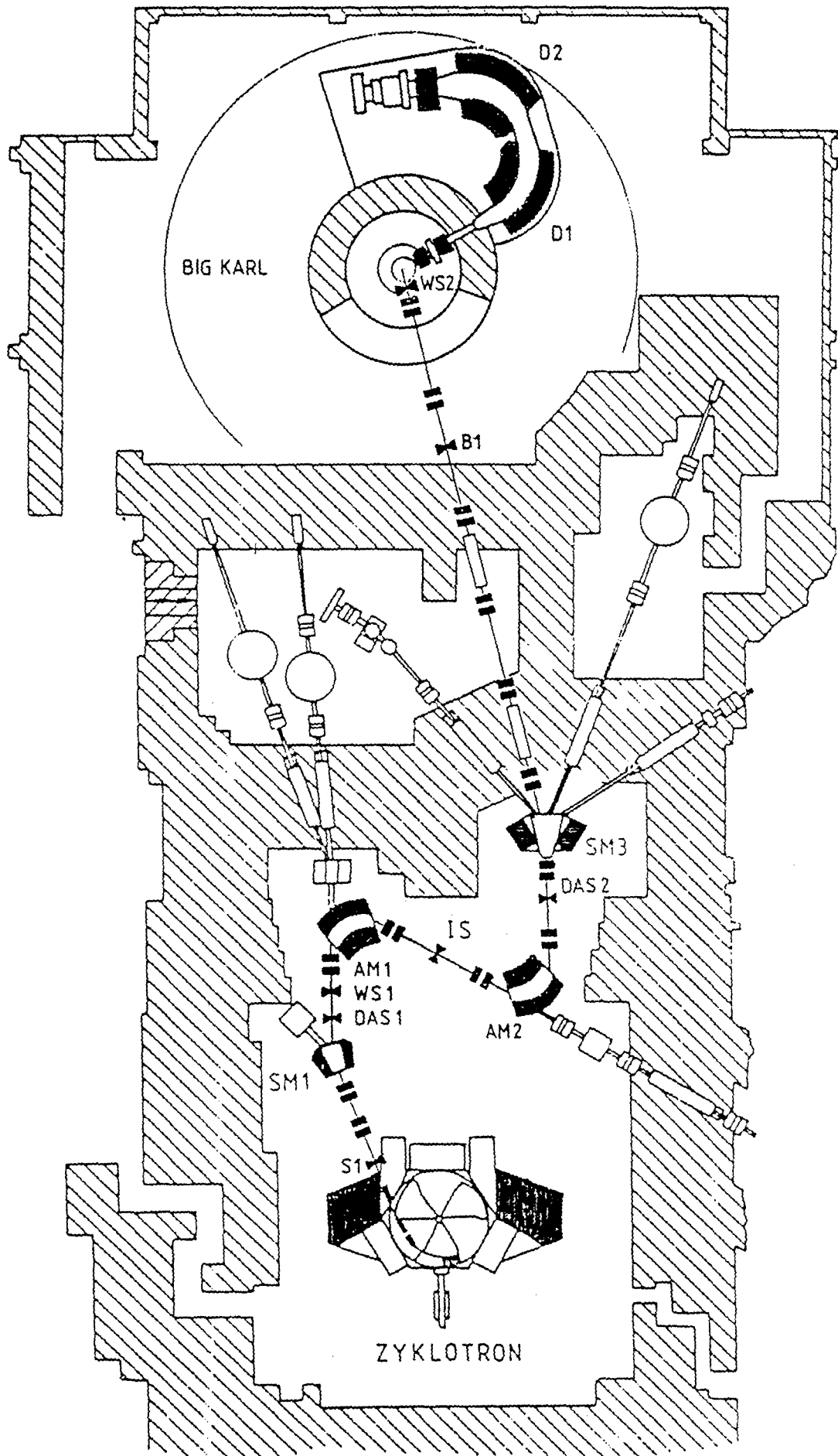


Abb.1: Entwurf einer modifizierten Strahlführung zwischen
Zyklotron und Magnetspektrograph BIG KARL (RE 84)

denen Quadrupollinsen zwei weitere Quadrupollinsen. Ein mögliches Anpassungssystem in diesem Sinne ist in der Abb. 1 skizziert.

2.4 Definierte Einstellung der Akzeptanz und Strahlzentrierung

Zum Schluß dieses Abschnitts soll noch kurz auf die definierte Einstellung der Akzeptanz mit Hilfe von Schlitzen und die automatische Zentrierung des Strahls eingegangen werden.

Zur Festlegung der Akzeptanz benötigt man zusätzlich zu dem x-y Doppelschlitz am Eingang des Monochromatorsystems einen zweiten x-y Doppelschlitz, der zur Begrenzung der akzeptierten Strahldivergenz verwendet wird. Die Strecke zwischen den beiden Doppelschlitzen sollte rund 1 m betragen und optisch eine reine Driftstrecke sein. Sämtliche Schlitze sollten bezüglich der Schlitzbreite und der Schlitzposition fernbedient einstellbar sein. Die Variation der Schlitzposition ist für Diagnosemessungen (Intensitätsprofilmessungen, pencil-beam Messungen etc.) wichtig. Die Schlitzbacken sollten elektrisch isoliert (Glimmerfolien) an großflächige wassergekühlte Kühlblöcke montiert sein, damit die Randstrahlintensität für Diagnose und Regelzwecke ohne Störuntergrund gemessen werden kann.

Die Zentrierung des ausgelenkten Zyklotronstrahls auf die Achse des Monochromatorsystems basiert auf einem Vorschlag von P. von Rossen (RO 83). Die Lage und der Winkel des Strahls in der horizontalen und vertikalen Ebene werden über die beiden x-y Doppelschlitze am Eingang des Monochromatorsystems festgelegt. Als Regelsignal dient die Asymmetrie der auf die Schlitzbacken

auftreffenden Randstrahlen. Das Asymmetriesignal wird einem PI Regler zugeführt, der auf geeignet positionierte Steuermagnete so einwirkt, daß die Asymmetrie verschwindet. Der Einbau dieses einfachen Regelsystems hat viele praktische Vorteile, von denen nur einige genannt werden sollen: (i) Die bei der Optimierung der Anpassungsquadrupole auftretenden "steering" - Effekte werden automatisch zu null kompensiert. (ii) Eine Kurz- und Langzeitdrift der Strahllage aufgrund von Änderungen im Zyklotronbereich wird automatisch kompensiert. Transmissionsverluste aufgrund dieses Effektes werden vermieden, ohne daß der Operateur eingreifen muß. (iii) Die Fixierung der Strahllage (Position und Winkel!) verhindert Störeffekte bei Messungen, bei denen es auf eine genaue Winkeldefinition ankommt.

3. Der Doppelmonochromator

3.1 Gegenwärtiger Zustand

Die ionenoptischen Elemente des existierenden Doppelmonochromators sind zwei große Dipolmagnete AM1 und AM2, zwei Quadrupollinsen AQ1 und AQ2 und zwei Sextupolmagnete SX1 und SX2, die bezüglich des Mittelschlitzes IS antisymmetrisch angeordnet sind (siehe Abb.2, die Sextupolmagnete SX1 und SX2 sind nicht eingezeichnet). Dieses System hat den Nachteil, daß nur eine einzige dispersive Einstellung mit einem für viele Experimente zu großem Verhältnis D/M (= dispersion/magnification) von 32 m möglich ist. Zusätzlich besteht das Problem, daß eine extrem große Winkeldispersion von $21.6 \text{ mrad}/(^{\circ}/\text{oo})$ angefacht wird und die Optik in der horizontalen und vertikalen Ebene deutlich von dem Ideal der teleskopischen Optik abweicht. Die extrem große Orts- und Winkeldispersion führt u.a. dazu, daß eine relativ hohe Impulsauflösung ($\Delta p/p \approx 5 \cdot 10^{-4}$) am Analysierschlitz eingestellt werden muß, um die horizontale Strahlenvelope in der nachfolgenden Strahlführung

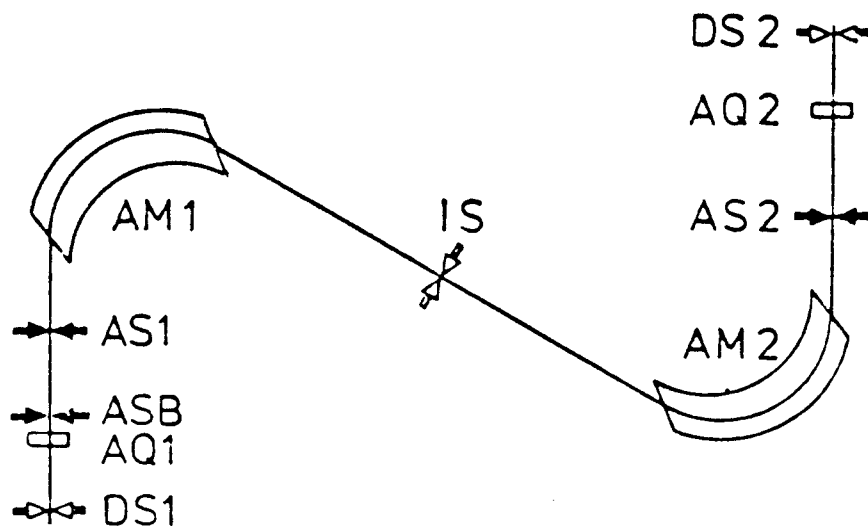


Abb.2: Das gegenwärtige Doppelmonochromatorsystem (RE 75)

und am Target zu begrenzen. Dadurch wird ein extrem großer Prozentsatz der primären Strahlintensität ($\sim 95\%$) an dem Analysierschlitz aufgefangen.

Neben der dispersiven Einstellung gibt es eine sogenannte achromatische Einstellung, bei der die Ortsdispersion am Schlitz AS2 verschwindet. In Wirklichkeit ist diese Einstellung jedoch nicht achromatisch, da die Winkeldispersion nicht verschwindet, sondern im Gegenteil den relativ großen Wert von $11.4 \text{ mrad}/(^{\circ}/\infty)$ am Schlitz AS2 annimmt. Die Einstellung ist die antisymmetrische Kombination der Dipolmagnete AM1 und AM2, bei der in der horizontalen Optik zwischen dem Eingangsschlitz AS1 und dem Mittelschlitz IS eine Punkt- nach Paralleltransformation vorliegt. Mit dieser Einstellung kann zwar ein relativ großer Prozentsatz der primären Strahlintensität transportiert werden, es besteht jedoch nicht die Möglichkeit, durch Anpassung der Winkeldispersion am Target des Magnetspektrographen simultan eine Dispersionsanpassung und eine kinematische Anpassung zu realisieren. Wenn man sich für die Dispersionsanpassung entscheidet, muß man eine vollständige kinematische Fehlanpassung in Kauf nehmen (und vice versa, siehe die Gleichungen (14) bis (16) unter Berücksichtigung der Tatsache, daß für die Größen c und s in diesem optischen Mode gilt: $c \neq 0$, $s = 0$). Dies bedeutet für die Praxis, daß keine nennenswerte Energieauflösung möglich ist. Die Einstellung hat zusätzlich den Nachteil, daß die Impulsunschärfe des transmittierten Strahls praktisch nicht definiert werden kann, da am Mittelschlitz IS eine Parallelstrahlbedingung vorliegt und am Ausgangsschlitz AS2 die Ortsdispersion verschwindet.

3.2 Die geplante Modifikation

Die von J. Reich ausgearbeitete Modifikation des Doppelmonochromatorsystems (RE '82) ist in Abb.3 dargestellt. Durch den Einsatz von 8 Quadrupollinsen wird eine große Flexibilität hinsichtlich der optischen Einstellmöglichkeiten erreicht. Das gesamte System zwischen dem Eingangsschlitz DAS1 und dem Ausgangsschlitz DAS2 ist antisymmetrisch bezüglich des Mittelschlitzes IS. Die Grundeinstellung, die in beiden Ebenen teleskopisch ist und zwischen den Schlitten DAS1 und DAS2 eine Punkt- zu Punkt-abbildung mit dem Abbildungsmaßstab 1 : 1 in der horizontalen Ebene und -1 : 1 in der vertikalen Ebene liefert, hat eine Ortsdispersion von 14.5 m und eine Winkeldispersion von 0 rad. Die Stärke der Impulsauflösung, d.h. das Verhältnis D/M (dispersion/magnification) beträgt damit 14.5 m und ermöglicht bei einer Eingangsschlitzbreite von 1 mm eine Impulsauflösung ($p/\Delta p$) von 14500. Diese Einstellung ist ideal für alle Standardexperimente am Magnetspektrographen.

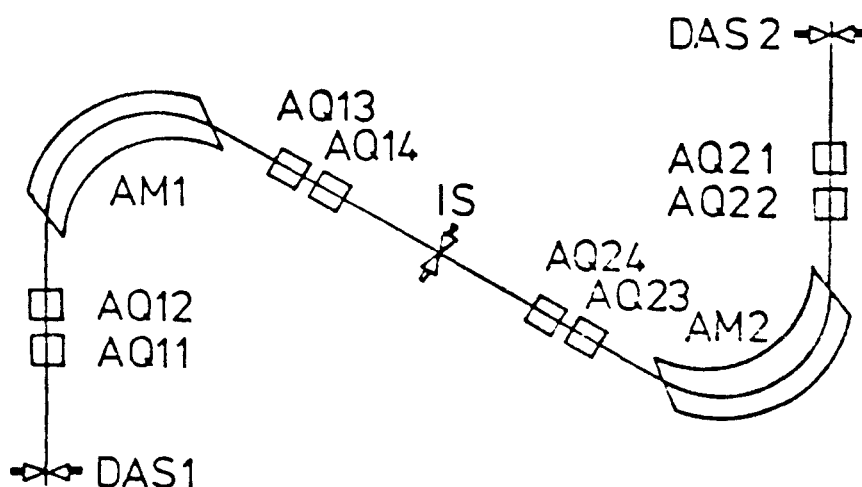


Abb.3: Entwurf eines modifizierten Doppelmonochromatorsystems (RE 82)

Mit Hilfe der Quadrupollinsen kann die Optik des Doppelmonochromators auch so variiert werden, daß die Stärke der Auflösung, d.h. der D/M Wert in einem weiten Bereich zwischen ~ 13 m und ~ 30 m variiert werden kann. Die Abweichungen von der teleskopischen Optik und die Winkeldispersion sind dabei noch relativ klein und können in der Praxis toleriert werden. Damit besteht die Möglichkeit einer Strahlpräparation mit extrem hohen Impulsaufösungen ($p/\Delta p \gtrsim 20000$).

Andererseits besteht auch die Möglichkeit der achromatischen Einstellung, bei der sowohl die Ortsdispersion als auch die Winkeldispersion am Ende des Doppelmonochromators verschwindet. Der Strahlengang ist dabei in der vertikalen Ebene teleskopisch. Die Abweichung von der teleskopischen Optik in der horizontalen Ebene ist relativ groß ($R_{21} = 2.78$ mrad/mm), aber bei einer Schlitzbreite von 1.0 mm bis 2.00 mm am Eingangsschlitz DAS1 noch tolerabel.

Die Aberrationen zweiter Ordnung (und z.T. auch höherer Ordnung) wurden nicht nur theoretisch (RE 83) sondern auch praktisch experimentell mit Hilfe der ray-tracing Technik untersucht (RO 83). Die Untersuchungen ergaben, daß zur Erzielung einer hohen Auflösung vor allem die geometrische Aberration ($x|\theta^2$) durch Korrekturen hinreichend klein gemacht werden muß. In dem existierenden Doppelmonochromatorsystem kann dies durch eine gezielte Einstellung der Sextupolmagnete SX1 und SX2 und eine kleine Modifikation der berechneten Einstellwerte der Quadrupole AQ1 und AQ2 erreicht werden (RO 83). Die idealste Stelle zur Korrektur der ($x|\theta^2$) Aberration ist allerdings in der Mitte der Dipolmagnete AM1 und AM2, da an dieser Stelle die zu korrigierende sinusähnliche Tra-

jektorie R_{12} am größten ist und der vertikale Strahlengang wegen der Kleinheit der vertikalen Envelope am wenigsten beeinflusst wird (RE 83).

Es wird daher vorgeschlagen, durch geeignete Shimbleche in der Mitte der Dipolmagnete AM1 und AM2 eine Grundkorrektur einzuführen und mit Hilfe der Sextupolmagnete eine Feinkorrektur vorzunehmen, falls dies überhaupt noch notwendig ist. Die experimentellen Untersuchungen zeigten jedenfalls, daß die relative Größe der Korrektur praktisch unabhängig von dem Feldniveau ist (RO 83). Der Autor möchte an dieser Stelle ausdrücklich davor warnen, zusätzlich zu den Shimblechen Korrekturspulen in Form von Stromplatten oder ähnlichem in der Mitte der Dipolmagnete anzubringen. Die Warnung bezieht sich auf die schlechten Erfahrungen, die mit einem derartigen Korrektursystem am Bonner Strahlführungssystem in der Praxis gemacht wurden. Eines der Probleme besteht darin, daß die Eichkurve Energie vs. Kernresonanzanzeige modifiziert werden kann und von der Tageseinstellung des Korrektursystems abhängen kann.

Zusammenfassend möchte ich feststellen, daß die geplante Modifikation des Doppelmonochromators unabdingbar notwendig ist, um eine optimale Nutzung des Zyklotronstrahls zu ermöglichen. Die Modifikationen sind zudem ohne großen Aufwand zu realisieren, da der Grundaufbau des Systems nicht verändert wird. Die Verbesserung des Doppelmonochromators kommt zudem nicht nur den Experimenten am Magnetspektrographen sondern auch allen anderen Streukammerexperimenten zugute. Im Hinblick auf COSY (BE 85) ist die Modifikation des Doppelmonochromators ebenfalls unabdingbar notwendig.

Zum Schluß dieses Abschnittes möchte ich noch eine Anmerkung zur Präparation eines möglichst untergrundfreien Strahles machen. Um den Halo, der durch die Schlitzkantenstreuung erzeugt wird, zu reduzieren, sollte der präparierte Strahl die Schlitzkanten des Ausgangsschlitzes DAS2 nicht berühren. Die Einstellung einer definierten Impulsbreite sollte am Mittelschlitz IS durchgeführt werden. Die Einstellung einer definierten Emittanz geschieht an dem Eingangsschlitzsystem. Der Ausgangsschlitz DAS2 sollte nur zu Diagnosezwecken soweit geschlossen werden, daß die Schlitzbacken den eigentlichen Strahl berühren. Ansonsten sollte die Breite des Ausgangsschlitzes DAS2 stets so eingestellt werden, daß der Halo von dem Eingangsschlitzsystem und dem Mittelschlitz IS weggefangen wird, aber kein neuer Halo erzeugt wird.

4. Die Strahlführung zwischen dem Doppelmonochromator und dem Magnetspektrographen

Die Strahlführung zwischen dem Doppelmonochromator und dem Magnetspektrographen hat neben der Dispersionsanpassung und der kinematischen Anpassung vor allem die Funktion, den Strahl über eine Strecke von 25 m zu transportieren. Dazu eignet sich vor allem eine angepaßte teleskopische Optik. Hierzu gibt es viele Lösungsmöglichkeiten. Bei dem in Abb.1 dargestellten Entwurf wird zwischen dem Ausgangsschlitz DAS2 und der Stelle B1 eine +I Transformation in beiden Strahlebenen mit fünf symmetrisch angeordneten Quadrupoldublettlinen erreicht. Die Strecke zwischen B1 und dem Target des Magnetspektrographen dient der Anpassung von Dispersion und Kinematik, die im Abschnitt 5 gesondert untersucht wird. Als Grundeinstellung ist eine ebenfalls doppelteleskopische -I Transformation zwischen B1 und Target möglich.

Vergleicht man die modifizierte Strahlführung zwischen DAS2 und B1 mit der gegenwärtig existierenden Strahlführung, so stellt man fest, daß sich die Gesamtzahl der benötigten Quadrupolmagnete nicht ändert. Die einzige Modifikation besteht darin, daß die einzelnen Quadrupollinsen in eine günstigere symmetrische Anordnung gebracht werden müssen. Daher gibt es auch die Möglichkeit, die existierenden Quadrupollinsen für die angestrebte Modifikation zu verwenden, wenn der Gesamtaufwand beim Umbau niedrig gehalten werden muß. Das symmetrische Arrangement der Quadrupollinsen hat den Vorteil, daß bei Verwendung von identischen Quadrupolmagneten eine Einparameter-Einstellung möglich ist, d.h. durch alle Quadrupolmagnete fließt der gleiche Erregerstrom (wenn man die Störung durch SM3 erst zwischen B1 und Target auffängt).

5. Dispersionsanpassung und kinematische Anpassung

5.1 Formale Betrachtung

Im folgenden soll die Strahlpräparation von einem (im Idealfall achromatischen) Zwischenbild am Eingangsschlitz des Monochromatorsystems zum Target unter dem Gesichtspunkt diskutiert werden, welche Transformationseigenschaften das System haben sollte. Die grundlegenden Formeln für die Anpassung des Strahls an ein Spektrometer sind aus (MA 83) entnommen (siehe auch (RE 75)). Die Notation ist in Anlehnung an das Transport Programm (BR 67) gewählt. Die Strahlführung vom Eingang der Strahlpräparation bis zur Fokalebene des Spektrographen wird folgendermaßen aufgeteilt:

$$\vec{x}_1 = B \vec{x}_0 \quad (1) \quad (B: \text{Beam Preparation})$$

$$\vec{x}_2 = T \vec{x}_1 \quad (2) \quad (T: \text{Targettransformation incl. Definition neuer Winkelvariabler } \theta_2 \text{ und } \varphi_2)$$

$$\vec{x}_f = S \vec{x}_2 \quad (3) \quad (S: \text{Spektrometertransformation})$$

Der Vektor \vec{x} steht jeweils für die 6 Phasenraumkoordinaten:

$$\vec{x} = \begin{array}{|l|l} \hline x & \text{radiale Ortsabweichung} \\ \hline \theta & \text{radiale Winkelabweichung} \\ \hline y & \text{axiale Ortsabweichung} \\ \hline \varphi & \text{axiale Winkelabweichung} \\ \hline z & \text{longitudinale Ortsabweichung} \\ \hline \delta & \text{longitudinale Winkelabweichung } (= \Delta p_z / p_0) \\ \hline \end{array} \quad (4)$$

Bei einer HHH Konfiguration (horizontale Dispersion am Target, horizontale Streuebene, horizontale Spektrometerebene) ergibt sich in linearer Näherung für die radiale Ortsabweichung x_f in der

Fokalebene die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}
 x_f = & x_o (S_{11} B_{11} T_{11} - K S_{16} B_{21}) \\
 & + \theta_o (S_{11} B_{12} T_{11} - K S_{16} B_{22}) \\
 & + \delta_o (S_{11} B_{16} T_{11} - K S_{16} B_{26} + S_{16} C) \\
 & + \theta_2 (S_{12} + K S_{16})
 \end{aligned} \tag{5}$$

Hierbei sind die Größen B_{ik} und S_{ik} die R-Matrixelemente der Strahlpräparation bzw. des Spektrometers. Für den Koeffizienten der Targettransformation T_{11} gilt:

$$T_{11} = \cos (\alpha_o - \epsilon) / \cos \epsilon$$

α_o ist der mittlere Streuwinkel und ϵ der Winkel zwischen Targetnormalen und Strahlachse. Die Größen C und K erfassen die kinematischen Effekte bei einer 2-Teilchenreaktion $A_1(a_1, a_2)A_2$

$$C = \frac{\partial p_2}{\partial p_1} \frac{p_1}{p_2} \quad (= \frac{\text{relative Impulsänderung der Ejektile}}{\text{relative Impulsänderung der Projektile}}) \tag{6}$$

$$K = \frac{1}{p_2} \frac{\partial p_2}{\partial \alpha} \quad (= \frac{\text{relative Impulsänderung der Ejektile}}{\text{Änderung des Streuwinkels}}) \tag{7}$$

Die Startkoordinaten $(x_2, \theta_2, \delta_2)$ eines Teilchens, das vom Target in das Spektrometer fliegt, sind bis auf die Winkelvariable θ_2 durch die Reaktion im Target festgelegt.

$$\begin{aligned}
 x_2 &= T_{11} x_1 \\
 \delta_2 &= K (\theta_2 - \theta_1) + C \delta_o
 \end{aligned}$$

Die Größe θ_2 ist eine zusätzliche Variable, die zu den Variablen x_0 , θ_0 und δ_0 hinzukommt. Der Variationsbereich von θ_2 ist durch die radiale Winkelakzeptanz des Spektrographen festgelegt.

Der zu erwartende Variationsbereich für die kinematischen Größen C und K ist durch die in Zukunft möglichen Experimente bestimmt. Eine grobe Abschätzung ergibt $0.5 \lesssim C \lesssim 2$ und $0 \lesssim K \lesssim 0.8$.

Wie im folgenden noch gezeigt wird, ist es auch sinnvoll, die radiale Winkelabweichung θ_f in der Fokalebene zu betrachten. Aus den Gleichungen (1) - (3) folgt für die Größe θ_f eine Gleichung mit einer ähnlichen formalen Struktur wie Gleichung (5):

$$\begin{aligned} \theta_f = & x_0 (S_{21} B_{11} T_{11} - K S_{26} B_{21}) \\ & + \theta_0 (S_{21} B_{12} T_{11} - K S_{26} B_{22}) \\ & + \delta_0 (S_{21} B_{16} T_{11} - K S_{26} B_{26} + S_{26} C) \\ & + \theta_2 (S_{22} + K S_{26}) \end{aligned} \quad (8)$$

5.2 Forderungen an die Strahlpräparation

Im folgenden sollen die ionenoptischen Bedingungen formuliert werden, die bei optimaler Anpassung der Strahlpräparation und des Spektrometers erfüllt sein müssen. Man unterscheidet hierbei allgemein zwischen der Dispersionsanpassung und der kinematischen Anpassung. Dispersionsanpassung bedeutet formal, daß in Gleichung (5) der Klammerausdruck bei δ_0 gleich null ist. Dann wird der Bildfleck in der Fokalebene des Spektrometers in 1. Ordnung unabhängig von der Impulsunschärfe des Primärstrahles. Kinematische Anpassung bedeutet

formal, daß in Gleichung (5) die Klammerausdrücke bei θ_0 und θ_2 gleich null sind. Dadurch wird der Bildfleck in der Fokalebene unabhängig von den Winkelabweichungen des primären Strahlteilchens und des sekundären Reaktionsteilchens.

Da bei dem Spektrometer BIG KARL die Dispersion variiert werden kann, muß vor jeder Anpassungsprozedur das Spektrometer auf eine bestimmte Dispersion eingestellt werden. Die Festlegung der Dispersion hängt u.a. von der erwünschten Auflösung ab. Der Einstellbereich für die Größe S_{16} liegt zwischen 0 und 26 m (MA 83), häufig wird als Standardeinstellung eine Einstellung mit $S_{16} = 13$ m verwendet.

Die kinematische Anpassung des Spektrometers ist von den übrigen Anpassungsprozeduren entkoppelt (siehe Glg.(5)). Daher wird man als ersten Schritt das Spektrometer so einstellen, daß folgende Beziehung gilt:

$$S_{12} + K S_{16} = 0 \quad (9)$$

Im Falle des Spektrometers BIG KARL wird die Gleichung (9) dadurch erfüllt, daß die Größe S_{12} mit Hilfe der beiden Quadrupole Q_1 und Q_2 am Eingang des Spektrometers eingestellt wird. Die Position der Fokalebene und die Dispersionsgrößen S_{16} und S_{26} bleiben unverändert.

Die Komplexität der weiteren Anpassungsprozeduren ergibt sich aus der Tatsache, daß die Größe S_{11} , d.h. die Vergrößerung des Spektrometers, bei der Variation der Größe S_{12} gemäß Gleichung (9) nicht konstant bleibt sondern drastisch variiert. Die numerische Analyse ergibt eine lineare K-Abhängigkeit der Matrixelemente S, die formal folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$S = \begin{vmatrix} S_{11}^0 & 0 & S_{16} \\ S_{21}^0 & S_{22}^0 & S_{26} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} + K \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Die Größen mit dem hochgestellten Index ⁰ entsprechen der Grundeinstellung für K = 0. Die folgende Beziehung ist ein numerisches Beispiel für eine Spektrometereinstellung mit der Dispersion $|S_{16}| = 13.25$ m.

$$S = \begin{vmatrix} 0.923 & 0 & -13.25 \\ 1.32 & 1.08 & -2.92 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} + K \begin{vmatrix} 12.1 & 13.25 & 0 \\ 4.44 & 4.84 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Im folgenden Unterabschnitt sollen die Anpaßbedingungen, die an die Strahlpräparation B zu stellen sind, im Detail untersucht werden. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen den Größen B_{11} , B_{12} , B_{21} , B_{22} und den Dispersionsgrößen B_{16} und B_{26} benötigt. Nach (BR 67) gelten die folgenden Beziehungen:

$$B_{16} = B_{12} \int c_x d\alpha - B_{11} \int s_x d\alpha = B_{12} c - B_{11} s \quad (12)$$

$$B_{26} = B_{22} \int c_x d\alpha - B_{21} \int s_x d\alpha = B_{22} c - B_{21} s \quad (13)$$

Für die folgenden Überlegungen sind die Integrale über die kosinus-ähnliche und sinusähnliche Trajektorie im Dipolfeld (der Monochromatormagnete AM1 und AM2 sowie des Schaltmagneten SM3, siehe (MA 83)) durch die Konstanten c und s erfaßt. Die Anpassung soll mit Quadrupollinsen durchgeführt werden, die zwischen dem letzten Dipolmagneten und dem Target stehen. Dadurch werden die Konstanten c und s bei der Anpassungsprozedur nicht variiert.

Die kinematische Anpassung und die Dispersionsanpassung ergeben nach Gleichung (5) die beiden Bedingungsgleichungen:

$$S_{11} B_{12} T_{11} - K S_{16} B_{22} = 0 \quad (14)$$

$$S_{11} (B_{12} c - B_{11} s) T_{11} - K S_{16} (B_{22} c - B_{21} s) + S_{16} C = 0 \quad (15)$$

Eine dritte Bedingung ergibt sich aus der Beziehung $\det(B) = 1$:

$$B_{11} B_{22} - B_{12} B_{21} = 1 \quad (16)$$

Die Analyse der Bedingungsgleichungen ergibt, daß die Größen B_{12} und B_{22} vollständig festgelegt sind:

$$B_{12} = \frac{K}{C} s \quad (17)$$

$$B_{22} = \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} s \quad (18)$$

Mit Gleichung (16) - (18) ist die Transformationsmatrix B bis auf einen freien Parameter (z.B. B_{11}) festgelegt:

$$B = \begin{vmatrix} B_{11} & \frac{K}{C} s \\ B_{11} \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} s - \frac{C}{K} \frac{1}{s} & \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} s \end{vmatrix} \quad (19a)$$

Für die Orts- und Winkeldispersion ergibt sich damit:

$$B_{16} = \frac{K}{C} sc - B_{11} s \quad (19b)$$

$$B_{26} = \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} sc + \frac{C}{K} - B_{11} \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{K} s \quad (19c)$$

Die folgende Betrachtung zielt auf die Frage, welche zusätzlichen Möglichkeiten der Anpassung durch den freien Parameter B_{11} in Gleichung (19) gegeben sind. Zunächst soll die Frage untersucht werden, ob die radiale Winkelabweichung θ_f in der Fokalebene unabhängig von der primären Impulsunschärfe δ_o gemacht werden kann. Damit wäre für die Gesamttransformation zwischen Eingangsschlitz und Fokalebene nicht nur die Ortsdispersion sondern auch die Winkeldispersion gleich null, d.h. die Gesamttransformation wäre achromatisch. Die Bedingung hierfür lautet, daß der Klammerausdruck bei δ_o in Gleichung (8) gleich null wird:

$$S_{21} B_{16} T_{11} - K S_{26} B_{26} + S_{26} C = 0 \quad (20)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (12), (13) und (16) - (19) ergibt dies die folgende vollständige Festlegung der Matrix B:

$$B = \begin{vmatrix} \frac{K}{C} & c & \frac{K}{C} & s \\ C & \frac{1}{s} + \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} c & \frac{S_{11}}{S_{16}} & \frac{T_{11}}{C} s \end{vmatrix} \quad (21a)$$

Für die Dispersionsgrößen bedeutet dies:

$$B_{16} = 0 \quad (21b)$$

$$B_{26} = C/K \quad (21c)$$

Es ist einleuchtend, daß diese spezielle Anpassung nur für $K \neq 0$ möglich ist. Eine sinnvolle achromatische Einstellung wird jedoch bereits bei relativ kleinen K Werten ($K \gtrsim 0.05 \text{ } ^\circ/\text{oo /mrad}$) möglich.

Für bestimmte Anwendungen wäre es auch wünschenswert, die Dispersionsanpassung mit der Nebenbedingung $B_{26} = 0$ zu realisieren. Nach Gleichung (19) ergibt diese Forderung die folgende Festlegung der Matrix B :

$$B = \begin{vmatrix} \frac{K}{C} c + \frac{1}{s} & \frac{S_{16}}{S_{11}} & \frac{C}{T_{11}} & \frac{K}{C} s \\ \frac{S_{11}}{S_{16}} & \frac{T_{11}}{C} c & \frac{S_{11}}{S_{16}} & \frac{T_{11}}{C} s \end{vmatrix} \quad (22a)$$

mit

$$B_{16} = - \frac{S_{16}}{S_{11}} \frac{C}{T_{11}} \quad (22b)$$

$$B_{26} = 0 \quad (22c)$$

Die beiden letzten Betrachtungen haben deutlich gemacht, daß zusätzlich wertvolle Anpassungsmöglichkeiten durch den freien

Parameter B_{11} in Gleichung (19) gegeben sind. Letztlich besteht die Variationsmöglichkeit, die Relation zwischen B_{16} und B_{26} oder zwischen B_{11} und B_{21} gezielt verändern zu können. Man hat damit z.B. auch die Möglichkeit, die Abhängigkeit der Größe θ_f von der Größe x_0 durch Nullsetzen des entsprechenden Klammerausdruckes in Gleichung (8) aufheben zu können. Die kinematische Anpassung und die Dispersionsanpassung, die auf die Bedingungsgleichungen (17) und (18) für B_{12} und B_{22} hinauslaufen, werden dadurch nicht tangiert.

5.3 Praktische Realisierung

Im folgenden werden zwei Systeme zur Realisierung der Anpassungsforderungen diskutiert. Das erste System basiert auf der Struktur des bisherigen Anpassungssystems, welches aus 4 einstellbaren Quadrupollinsen unmittelbar vor dem Target besteht (siehe Abb.4).



Abb.4: System zur kinematischen Anpassung und zur Dispersionsanpassung

P: Übergabepunkt, T: Target

Zur Variation von B_{11} ist das System nach einem Vorschlag des Autors um eine weitere Quadrupollinse am Übergabepunkt P er-

weitert, so daß insgesamt 5 freie Einstellparameter zur Verfügung stehen.

Das modifizierte Doppelmonochromatorsystem erlaubt als Standardeinstellung am Übergabepunkt P eine Einstellung mit der radialen R-Matrix ($s \neq 14.5$ und $c \neq 0$ durch die Wirkung von SM3!):

$$R_x = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -s \\ 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -14.17 \\ 0 & 1 & -0.2647 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (23)$$

und der vertikalen R-Matrix:

$$R_y = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (24)$$

Mit den 5 freien Quadrupolparametern des nachfolgenden Systems kann man nun gezielt die folgenden 5 Bedingungen einstellen:

$$B_{11} = \frac{K}{C} c \quad (\text{oder eine andere Bedingung})$$

$$B_{12} = \frac{K}{C} s$$

$$B_{22} = \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{C} s \quad (25)$$

$$B_{33} = 1$$

$$B_{34} = 0$$

Das System erlaubt bei einer Gesamtlänge von 7.2 m die kinematische Kompensation bis zu K Werten von $K = 0.4 \text{ } ^\circ/\infty \text{ /mrad}$.

Das zweite System benutzt ein vom Autor entwickeltes Modul (HI 84), mit dessen Hilfe in der horizontalen Strahlebene eine frei wählbare Drift L und in der vertikalen Strahlebene eine -1 Punkt-zu-Punkt Transformation eingestellt werden kann. Durch Hinzufügen von je einer "dünnen Quadrupollinse" mit der Brechkraft $1/f$ bzw. $1/F$ am Eingang und Ausgang des Systems erhält man ein Anpassungssystem, das eine weitgehend entkoppelte Einstellung der Matrixelemente B_{11} , B_{12} und B_{21} erlaubt. In Matrixschreibweise dargestellt hat die horizontale Optik folgende Struktur (siehe auch Abb.5):

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1/F & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1 & L \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1/f & 1 \end{vmatrix} \quad (26)$$

$$B = \begin{vmatrix} -1 + \frac{L}{f} & L \\ -\frac{1}{F} - \frac{1}{f} + \frac{L}{Ff} & -1 + \frac{L}{F} \end{vmatrix} \quad (27)$$

Nach Festlegung der Größe $B_{12} = L$ kann man mit dem ersten Linsenparameter $B_{11} = -1 + L/f$ und mit dem zweiten Linsenparameter $B_{22} = -1 + L/F$ unabhängig voneinander einstellen. Das System erlaubt bei einer Gesamtlänge von 7.2 m die kinematische Kompensation bis zu K Werten von $0.8^\circ/\text{oo}/\text{mrad}$.

Da man an dem Target des Magnetspektrographen keine Quadrupollinse einsetzen kann, muß dieses Anpassungssystem jedoch um eine doppelteleskopische -1 Einheit versetzt vor dem Target eingebaut werden. Die mögliche Struktur des resultierenden Systems zwischen Doppelmonochromator (Schlitz DAS2) und Magnetspektrograph (Target T)

ist in Abb.5 skizziert. Gegenüber dem Entwurf in (HI 84) wurde das System so modifiziert, daß nur 7 anstatt 9 Quadrupolmagnete benötigt werden. Die Ionenoptik wurde dadurch nur unwesentlich verändert.

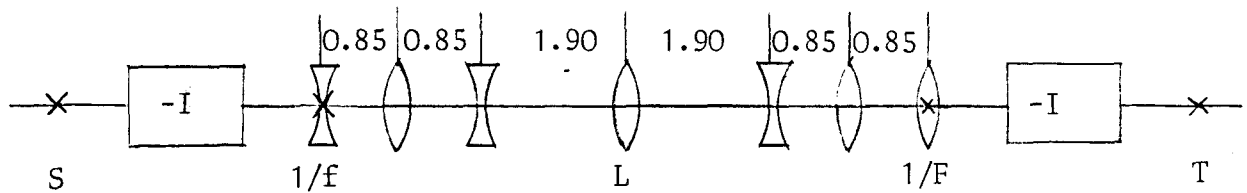


Abb.5: Alternative zur Dispersionsanpassung und kinematischen Anpassung. Die angegebenen Zahlen geben die Distanzen in m zwischen den Mittelebenen der Quadrupole an.

S: Ausgangsschlitz, T: Target

5.4 Die Auflösung

Die Grenze der Auflösung ist durch die Größe des Bildflecks in der Fokalebene und die Dispersion des Spektrometers festgelegt. Wenn zwei Teilchengruppen aufgrund eines leicht unterschiedlichen Q-Wertes eine relative Impulsabweichung $\Delta p/p$ haben, erscheinen in 1. Ordnung ihre Linienschwerpunkte mit einem räumlichen Abstand $\Delta x = S_{16} \Delta p/p$ in der Fokalebene. Die Grenze der Auflösung ist erreicht, wenn der räumliche Abstand Δx gerade gleich der Linienbreite der Teilchengruppen ist, d.h. in 1. Ordnung gleich der effektiven Vergrößerung ($M_{ov} = M_{overall}$) mal der horizontalen Schlitz-

breite Δx_0 am Eingang des Monochromatorsystems:

$$S_{16} \cdot \Delta p/p = \underbrace{(S_{11} \ B_{11} \ T_{11} - K \ S_{16} \ B_{21})}_{M_{ov}} \Delta x_0 \quad (28)$$

Das Auflösungsvermögen $p/\Delta p$ wird damit:

$$\frac{p}{\Delta p} = \frac{S_{16}}{M_{ov}} \frac{1}{\Delta x_0} \quad (29)$$

Es ist interessant, die Stärke des Auflösungsvermögens, d.h. die Größe S_{16}/M_{ov} für den Fall zu diskutieren, bei dem kinematische Anpassung und Dispersionsanpassung zwischen dem Monochromatorsystem und dem Spektrometer vorliegen.

Nach Gleichung (19) gilt:

$$M_{ov} = S_{11} \ B_{11} \ T_{11} - K \ S_{16} \left(B_{11} \frac{S_{11}}{S_{16}} \frac{T_{11}}{K} - \frac{C}{K} \frac{1}{s} \right) \quad (30)$$

$$M_{ov} = S_{16} \ C/s \quad (31)$$

d.h. M_{ov} ist unabhängig von K . Die Stärke des Auflösungsvermögens ist damit:

$$S_{16}/M_{ov} = s/C \quad (32)$$

d.h. nur von dem Integral über die sinusähnliche Trajektorie im Bereich der Dipolmagnete (siehe Gleichung (12)) und der kinematischen

Größe C (siehe Gleichung (6)) abhängig.

Dieses Resultat ist auf dem ersten Blick vor allem deshalb verblüffend, weil Spektrometereigenschaften wie die Dispersion S_{16} oder die Vergrößerung S_{11} in der Beziehung C nicht mehr auftauchen. Man sieht an der Gleichung (32) die große Bedeutung des Monochromatorsystems. Die Stärke des Auflösungsvermögens wird z.B. für $K = 0$ nicht durch das Verhältnis S_{16}/S_{11} , sondern durch das Verhältnis B_{16}/B_{11} bestimmt. Nichtsdestotrotz ist für eine hohe Auflösungsstärke eine entsprechend große Dispersion S_{16} notwendig, damit die effektive Vergrößerung M_{ov} für die praktische Anwendung nicht zu klein wird. Im Falle des Spektrometers BIG KARL kann die Dispersion S_{16} im Bereich 0 - 26 m variabel eingestellt werden, so daß für alle praktischen Anwendungen eine optimale Dispersion möglich ist. Auch wenn man die Standardeinstellung mit $S_{16} = 13$ m verwendet, kann man die Auflösung des Gesamtsystems durch Variation der Monochromatoreinstellung nach Gleichung (32) variieren. Der praktisch einstellbare Bereich für die Größe s, d.h. für die Auflösungsstärke des Doppelmonochromatorsystems, ist:

$$13 \text{ m} \lesssim s \lesssim 30 \text{ m}$$

Für Reaktionen mit $C = 1$ ist damit der Einstellbereich der Auflösungsstärke S_{16}/M_{ov} :

$$13 \text{ mm}^{\circ}/\infty \leq S_{16}/M_{ov} \leq 30 \text{ mm}^{\circ}/\infty.$$

Für eine Eingangsschlitzbreite $\Delta x_0 = 1\text{mm}$ ergibt sich für die Grenze der Impulsauflösung in 1. Ordnung der Einstellbereich:

$$13000 \leq p/\Delta p \leq 30000$$

und für eine Eingangsschlitzbreite von $\Delta x_0 = 0.5 \text{ mm}$

$$26000 \leq p/\Delta p \leq 60000.$$

Es ist klar, daß die praktisch erzielbare Impulsauflösung durch Aberrationen höherer Ordnung und das endliche Ortsauflösungsvermögen des Fokalebeneendetektors kleiner sein werden als die in linearer Näherung ermittelten theoretischen Grenzwerte.

6. Schlußfolgerungen und Schlußbemerkungen

Zusammenfassend möchte ich folgende Schlußfolgerungen ziehen. Die geplante Modifikation der Strahlführung zwischen Zyklotron und Magnetspektrograph, die in Abb.1 dargestellt ist, ist aus mehreren Gründen sinnvoll und notwendig. (i) Die Modifikation der Anpassung zwischen Zyklotron und Monochromatorsystem erlaubt eine flexible Emittanzanpassung. Die Installation von 6 Quadrupollinsen ermöglicht u.U. sogar die achromatische Präparation des Strahles. (ii) Die Modifikation des Doppelmonochromatorsystems mit Hilfe von 8 Quadrupollinsen ermöglicht eine doppelteleskopische, dispersive Einstellung mit einer Impulsauflösung von 14500 bei einer Eingangsschlitzbreite von 1mm. Mit Hilfe der Quadrupollinsen kann die Auflösung in einem weiten Bereich zu größeren Werten hin variiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit eines achromatischen Strahltransportes mit einer Transmission von 100 %. (iii) Der doppelteleskopische Strahltransport vom Doppelmonochromator zu dem Übergabepunkt B1 ist durch die symmetrische Anordnung der Quadrupollinsen besonders leicht einzustellen, da es sich um eine Einparametereinstellung handelt. (iv) Mit dem in Abb.1 gezeigten System von 4 Quadrupollinsen kann man simultan die Dispersionsanpassung und die kinematische Anpassung für K Werte bis $K = 0.4$ realisieren. Ich empfehle allerdings den Einbau eines zusätzlichen Quadrupols am Eingang des Systems, wie in Abb.4 skizziert. Mit dem zusätzlichen Parameter ergibt sich u.a. die Möglichkeit, die horizontale Winkelabweichung der Strahlen in der Fokalebene unabhängig von der primären Impulsunschärfe δ_0 des Zyklotronstrahls zu machen. Wenn die kinematische Anpassung auch zu höheren K Werten erwünscht ist, empfiehlt sich der Einbau eines Systems wie in Abb.5 skizziert. Ein solches System hätte zudem

den Vorteil, daß die verschiedenen Matrixelemente weitgehend entkoppelt eingestellt werden könnten.

Da die gegenwärtig existierende Strahlführung eine optimale Nutzung des Zyklotronstrahls am Magnetspektrographen nicht möglich macht und zudem noch sehr lange Einstellzeiten in der Praxis erfordert, ist eine möglichst zügige Modifikation der Strahlführung notwendig. Die höchste Priorität sollte dabei die Modifikation des Doppelmonochromators haben. In der Prioritätenliste steht an nächster Stelle die Modifikation der Strahlführung zwischen DAS2 und dem Übergabepunkt B1 zu einer doppelteleskopischen +I Einheit und des Systems zur Anpassung von Dispersion und Kinetik. Als Schlußpunkt kommt die Modifikation des Systems zur Anpassung der Emittanz und Dispersion zwischen Zyklotron und Doppelmonochromator. Die Maßnahmen zur Festlegung einer definierten Akzeptanz am Eingang des Doppelmonochromators und zur automatischen Strahlzentrierung sollten jedoch mit höchster Priorität durchgeführt werden.

Zum Schluß möchte ich Joachim Reich, Manfred Rogge und Peter von Rossen für viele hilfreiche Diskussionen und die Bereitstellung der Informationen und Daten zu diesem Bericht herzlich danken.

Literaturverzeichnis

- (AL 81) L. Aldea, R. Brings, R. Fiedler, J. Reich and P. Wucherer, IKP, KFA Jülich, Annual Report 1981, p. 113
- (BE 85) G. Berg et al., COSY, Proposal for a Cooler-Synchrotron, to be published
- (BR 67) K.L. Brown, SLAC Report 75 (Stanford 1967)
- (BR 80) K.L. Brown, D.C. Carey, Chr. Iselin and F. Rothacker, CERN Report 80-04 (Genf, 1980)
- (HI 81) G. Hinderer, Proc. 9th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Caen, 1981
- (HI 84) F. Hinterberger, Design of a novel matching module, IKP, KFA Jülich, Annual Report, 1984
- (JO 75) W. Joho, Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Zürich, 1975 (Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart 1976)
- (MA 83) S.A. Martin, A. Hardt, J. Meissburger, G.P.A. Berg, U. Hacker, W. Hürlimann, J.G.M. Römer, T. Sagefka, A. Retz, O.W.B. Schult, K.L. Brown and K. Halbach, Nucl. Instr. and Meth. 214 (1983) 281
- (RE 75) J. Reich, S. Martin, D. Protić and G. Riepe, Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Zürich 1975 (Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart 1976) p. 235
- (RE 81) J. Reich, IKP, KFA Jülich, Annual Report 1981, Jül-Spez-146, p. 116

- (RE 82) J. Reich, M Rogge and L. Zemło, IKP, KFA Jülich, Annual Report 1982, Jül-Spez-202, p. 103
- (RE 84) J. Reich, M. Rogge, L. Zemło, F. Hinterberger, P. von Rossen, Modernization of the External Beam Handling System at JULIC, 21st European Cyclotron Progress Meeting, Jülich 1984
- (RO 83) M. Rogge, J. Reich, L. Zemło, J.G.M. Römer, G. Berg, H. Hagedoorn, G. Hlawatsch, H. Lawin, J. Meissburger, W. Oelert, G. Riepe, P. von Rossen, D. Protić, M.D. Trivedi and P. Turek, IKP, KFA Jülich, Annual Report 1983, Jül-Spez-255, p. 120
- (RO 83) P. von Rossen, Techn. Notiz (Bonn 1983)

